

ユーザのみなさまにホットな情報をお届けする

# REPORT

## ミットヨレポート

- 第267号 ●2018年6月 ●編集・発行/株式会社ミットヨ
- 川崎市高津区坂戸1-20-1 〒213-8533 電話 (044) 813-8235 ファクス (044) 813-8231
- ホームページアドレス <http://www.mitutoyo.co.jp>

No. 267

## 高精度デジマチックマイクロメータ MDH-25MB



### 巻頭言

#### 測定行為と文理の融合

立教大学文学部  
英米文学専修  
教授 新田 啓子 様

### 特注対応商品の紹介

#### エンジンボア内壁測定システム BoreTex-WLI

### USER REPORT.....137

滋賀県米原市  
東レ・カーボンマジック株式会社 様

### USER REPORT.....138

広島県呉市  
株式会社ヒロコーゼットテクノロジー 様

### NEW TECHNOLOGY TREND

#### 光周波数コム装置による 長さの最新トレーサビリティ体系

弊社  
川崎 和彦・鈴木 義将・沼山 博志

Mitutoyo Quality

Mitutoyo

# 測定行為と文理の融合

立教大学文学部  
英米文学専修

教授 新田啓子様



1949年にノーベル文学賞を受賞したアメリカの文豪、ウィリアム・フォークナーの代表作に『死の床に横たわりて』（1930年）という小説がある。妻を亡くしたミシシッピ州の貧農が、その亡骸を子供たちとともに彼女の故郷に連れ帰り、埋葬するまでのドラマを綴った物語だ。その冒頭、腕のいい大工である長男が、母のための棺を作る場面がある。鋸で板を切り、角を合わせて釘で打ち付け、鉋で表面を整える様子が印象的に描かれている。だが興味深いことに、この男が資材を測る場面については全く書かれていないのだ。浮遊するおがくず、響く槌音、加工される板材……だが、精巧な仕事の根本にあるはずの「測定」が、このようなリアリズムから除外されているのである。

これは一体なぜなのか。測る際には通常目立った音もたたず、アクションも地味であるためか。無論その可能性もあるだろう。けれども、日々少しでも何かを作ったことがあれば、人は正しく測るという行いが作業の結果を左右する、重要な工程であることを想像できるはずなのだ。すると、別の可能性に思い当たる。つまり、その種の精確さをあまり意識しない人、その方面に疎い人の存在である。果たしてフォークナーは、おそらくそちらのタイプに属する人間だったのではないか。言いかえれば、日常的な測定という営みは、極めて理系的な作業でもあり、科学的な厳密性を象徴する行いであるということだ。文系の人々は時として、その重要性への頓着がない。いうなれば測定は、ある意味文理の壁となりうる。

しかし同時に、私が専門とする北米文学作品の、度量衡の際立った表象を調査すると数自体は多くないが、そのメッセージ性は鮮烈である。マハトマ・ガンディーも愛読したヘンリー・ソーの随筆『森の生活』（1854年）は、その豊かな一例だ。独力でおのれの生の足場を築くことを重視したソーは森、湖沼、耕地を測量し、収穫物を数えることで生

産性を把握して、労働と思索のバランスおよびエコロジーと人間の自由を訴えた。

ちなみに我が国で理工系の文人を探せば、宮沢賢治は最も著名な例かもしれない。例えば『三原三部』（1928年）では、大島での農学校設立を目指した彼が現地視察に訪れた際、雨量の測定法を教えた言葉がそのまま詩になっている。他方、現岩手大学農学部は、彼自身もその使い方を実習した可能性のあるノギスをはじめ様々な計器を保存している。命の尊さを文学に託して訴えた宮沢だからこそ、その理念の実践にまず役立ったであろう技術教育のレガシーは、深い感懐を呼び起こす。

さて話をアメリカに戻すと、測径器が登場する最も近年の小説は、おそらくトマス・ピンチョンの大作『逆光』（2006年）である。科学技術の革新や物理法則の発見が兵器などにも応用されて新たな恐怖を生み出した、第一次大戦前夜の欧米が舞台の物語。スパイ活動を暗示する小道具として、纏う者の気配を消す「消音コート」なる新製品が登場するが、その採寸を受ける女性数学者が必要以上に身体の部位を測定・記録される場面で巨大キャリアが使用される。こんなことが、今現実には起ればハラスメントとされるだろうが、事実、近代史にあって計測とは、人間のモノ化や格付けに寄与し、正常と異常を画す尺度をも産出してきた。

測る行為に仄めかされるこうした倫理的含蓄は、一転、いわゆる文系の守備範囲に見えるだろう。しかし（村上春樹とともに）毎年ノーベル賞候補にあがるこのピンチョンという小説家は、コーネル大学工学部に学び、物理学者としてのキャリアを嘱望された経歴をもつ。つまり「測定」とは、文理の壁というよりは、その融合によって解き明かすべき、文明の明暗を刻んだ営みと見なされる。文系と理系に峻別できる知識などない——そのような理を測定の文学表象は示唆しているといえるだろう。

## 特注対応商品の紹介

### ぜひ、ミットヨにお任せください。

ミットヨでは、当社の標準品をベースに特定ワーク専用の測定機の製作にも対応しております。お客様それぞれのワークに対応する専用測定機の設計や性能検査にかかる費用も含めてご発注いただくことで、トータルなコスト削減に貢献いたします。

お客様それぞれの要望に対応する、いわばオーダーメイドの**オンリーワン**測定機である汎用測定機をぜひご用命ください。



## エンジンボア内壁測定システム BoreTex-WLI

### 【特長】

- 非接触3D表面性状解析が可能
- クロスハッチやピットの解析も可能
- CNC制御の自動計測が可能

### 【アプリケーション】

- エンジンブロックの溶射ボア内壁
- シリンダライナーのホーニング加工内壁

### 【解析機能】

ピット解析	クロスハッチ解析
<p>島の数・グレインの面積・境界輪郭線の長さ・公称直径・平均直径・最小直径・最大直径・最小直径アングル・最大直径アングル 形状要素・アスペクト比・真円度・コンパシティ方向・体積・最大高さ</p>	<p>溝形状、深さ、角度、表面粗さ パワースペクトル密度 (PSD) スペクトル解析</p>
<p>ピット解析のヒストグラム表示</p>	
<p>2D粗さ解析のためのピット除去 2D粗さ解析</p>	

### 【本体仕様】

測定仕様項目		仕様
測定対象	測定可能ボア径	φ70 mm~φ100 mm
	ストローク(深さ)	最大153 mm
ステージ可動範囲(X、Y、Z)		X: 650 mm Y: 600 mm Z: 420 mm
RMS再現性		50 nm
解析	ピット解析	面積計算、体積計算、面積率計算、ヒストグラム表示
	粗さ解析	ピット除去後のRa, Rk, Rvk, Rpk
測定時間(5xレンズ使用時の参考値)		670 秒 (測定範囲: 2 mm×3 mm)

滋賀県米原市 東レ・カーボンマジック株式会社 様



## レーシングカー開発で培った技術と創造力でものづくりの可能性を追求する

安全・環境部  
マネージャー 宮木 隆 様

### 多様な製品・部品の機能向上に挑む

東レ・カーボンマジック株式会社（以下、カーボンマジック）は、CFRPを素材とする、「カーボンコンポジット」と呼ばれる製品を製造するメーカーです。

炭素繊維と樹脂を原料とするCFRPは、比強度が鉄の10倍であることから、「軽くて強い」素材として知られています。加えて設計自由度が高く、部品の一体化、中空構造など、カーボンコンポジットならではの構造を実現できることから、近年金属製品の代替素材として注目度が急速に高まっています。

カーボンマジックの前身は、レーシングカーコンストラクター 童夢グループの童夢カーボンマジックです。

「レーシングカーの開発は、カーボンコンポジットをはじめとする複合材料の性能競争です。そんな厳しい環境で、長年にわたり培ってきた製品化技術が、現在の私たちのバックグラウンドになっています」

カーボンマジックの事業についてこう説明するのは、過去にはレーシングカー部品などの開発に携わってきた、安全・環境部 マネージャーの宮木 隆様です。

「製品化構想、設計から、試作、量産まで、一気通貫で推進する開発体制もまた、レーシングカー開発で鍛えられた私たちの優位性です」と宮木様。充実した開発体制の下でカーボンマジックは、さまざまな分野の製品・部品を対象に、カーボンコンポジットの特性を最大限に生かして既存製品の可能性を拡大するという、価値創造を目指す研究開発に積極的に取り組んでいます。

「今まさに、金属素材からカーボンコンポジットへと素材がシフトしている歴史の転換期にあり、潜在的な需要は計り知

れません。そうした中で、お客様の要求を満たすのはもちろん、さらなる付加価値を創造して、コストを考慮しても納得し



カーボンコンポジットを使用した各種製品

てご利用いただける製品を研究開発していくことがカーボンコンポジット製品の用途拡大につながっていくと考えています」と宮木様は語ります。

カーボンコンポジットから部品の形状を作り出す成型方法は複数ありますが、



品質保証部  
荘野 悠 様



営業・広報部 アシスタントマネージャー  
松山 亜紀 様



今回のミットヨレポートは、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic、炭素繊維強化プラスチック)を素材とする、カーボンコンポジット製品の開発を手掛ける東レ・カーボンマジック株式会社様です。レーシングカー開発で培った技術を駆使して、創造性豊かに高付加価値製品を生み出し続ける同社の品質保証についてお話を伺いました。



●所在地:滋賀県米原市三吉215-1 ●設立:2013年4月 ●事業内容:コンポジット材料に関する調査・研究・開発、コンポジット製品の調査・企画、設計・製作・開発・製造・販売  
●URL: <https://www.carbonmagic.com>

その中でカーボンマジックは、カーボンコンポジットが持つ設計の自由度を最大限に生かせる製法である「オートクレーブ

製法」を採用しています。お客様の要望に細やかに対応しながら、同時に新たな付加価値を提案するために、オートクレーブ製法の選択は極めて

重要な意味を持つとのことでした。

レーシングカーから始まったカーボンマジックの製品開発は現在、航空機を中心に、自動車、産業機械、医療機器など、多様な領域に勢いよく拡大しています。

### 品質保証でフル稼働する 三次元測定機

金属材料同様に、高い加工精度が求められる製品も多いことから、カーボンマジックは品質保証にも万全の体制を敷いています。

「私たちが手掛けている製品の中でも特に高い精度を要求されるのは、医療機器の部品です。精密機械を取り付けるための穴位置や穴径などを測るには、どうしてもノギスなどのハンドツールでは不十分なので、こうした箇所をミットヨのCNC三次元測定機、CRYSTA Apex S 122010を用いて測っています」と語るの

は品質保証部 荘野 悠 様です。

同機種を導入したのは2014年。その経緯について荘野様は、「5軸制御のプロープによって3軸では難しかった形状測定が可能になることと、プログラミングが平易で、私たち初心者にも手軽に取り組めたことです」と説明します。

事業の拡大にともない、CRYSTA Apex S 122010がフル稼働するようになったことから、17年にはCRYSTA Apex S 9108をご導入いただきました。現在はCRYSTA Apex S 2台体制で、多数の製品の品質管理に取り組んでおられます。

これまで、10年にわたってカーボンコンポジット製品の品質保証に携わってきたという荘野様。今後、取り組んでいきたいことについて尋ねると「後進の育成」であるとの答えが返ってきました。

「設計の自由度が高く、自由形状が取り入れられることが多いカーボンコンポジット製品には、検査の際に基準がはっきりしないという難しさがあります。困ったときは設計開発部と相談しながら課題をクリアしていくのですが、担当者自身も図面をパッと見て計測方法を発

案できるくらいでなければ必要な役割は果たせません。三次元測定機での精密測定が必要な製品はどんどん増えていくでしょうから、今後は品質保証のメンバー一人ひとりが確かなスキルを備えることを目指して、スキルアップに取り組んでいきます」と語っていただきました。

たゆまぬ努力によってカーボンコンポジット製品市場をリードする東レ・カーボンマジックは、今後も未来に向かって邁進されることでしょう。



フル稼働のミットヨ CNC三次元測定機 CRYSTA-Apex S

広島県呉市 株式会社ヒロコーゼットテクノロジー 様



## 社員一人ひとりが 品質と向き合い実現した 最高水準の加工技術で 世界市場に挑む

代表取締役社長 田代 博造 様

### 加工実績と信頼を積み重ねながら 受注数を拡大

株式会社ヒロコーゼットテクノロジーは、1956年に広島工具製作所として設立されました。創業者であり、現社長田代 博造様のご祖父様である田代 徳造様が、戦後の財閥解体の影響を受けて倒産したドリルメーカーを買い取り、空襲で焼け出され廃棄されたドリルやリーマを研磨して再生する事業を興したことが同社の始まりです。

やがて、特殊ドリルや海外向けのセットドリルの製造を手掛けるようになり、成長路線を歩み始めた同社でしたが、1971年のニクソン・ショックによって日本の輸出産業が大ダメージを受けたのをきっかけにドリル製造から撤退。それまで培ってきた精密加工技術を活かして、特殊工具や部品加工へと主力事業をシフトしました。



加工設備

その10年後、レスプロコンプレッサー部品の製造などで取引があった石川島播磨重工業（現IHI）が、呉を拠点に大型の民間航空ジェットエンジン部品の製造を開始します。その時、すでに徳造様からバトンを引き継ぎ経営の舵を握っていた田代社長は、航空宇宙事業への進出を決意します。

「この時が間違いなく、当社にとってのターニングポイントでしたね」と田代社長は振り返ります。

その後、同社の航空宇宙事業は着実に成長を続け、現在では売上の6~7割を占めています。タービンディスクなど、受託しているのは高度な精密加工技術を要するジェットエンジンの主要部品がほとんどです。このことから、同社が卓越した加工技術によってお客様から絶大な信頼を得ていることが分かります。

「といっても、最初から現在のような精密加工を要する主要部品を受注できたわけではありません。ジェットエンジン部品など品質基準が極めて厳しいものづくり分野では、お客様の要望に応えられる十分な体制を整えるのに時間がかかるものです。しかも、一度体制を整えても、新しい技術の登場によって刃物や工具が高機能化すれば、それを使いこなす技術が



大型のミットヨCNC三次元測定機

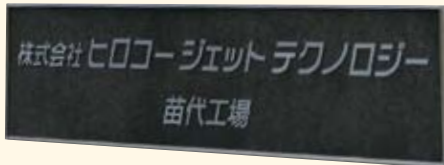


ミットヨCNC三次元測定機 CRYSTA-Apex EX 123010R

新たに必要になるので、絶えず技術革新に取り組みなければなりません。私たちの場合も、お客様の要望に応えられるだけの技術力を得るまでに数年を要しました。ジェットエンジン部品製造に用いる大型治具を手始めに、エンジン部品の荒加工、仕上げ加工、エンジン部品の製造委託というように、一歩ずつ受託内容をレベルアップし、必要な技術を蓄積していった結果、現在の事業にたどり着くことができたのです」と田代社長は語ります。



戦後、軍需産業の遺産を活かした造船や鉄鋼業が成長し、中国地方を代表するものづくり都市へと発展した広島県呉市。今回の訪問先は、航空機のジェットエンジン部品を長年にわたり手掛けている同市郷原町の株式会社ヒロコージェットテクノロジー様です。世界規格に基づく厳格な品質管理体制の下で取り組むものづくりについて伺いました。



●所在地：広島県呉市郷原町2507-916 ●設立：1956年5月 ●事業内容：ジェットエンジン部品（航空機、陸船用）、宇宙ステーション・ロケット部品、レシプロ大型コンプレッサー部品、ガスタービン部品、ハイテク産業部品などの製造 ●URL：<http://www.hiroko-jet.co.jp>



ミットヨCNC三次元測定機 FALCIO-Apex 162012

### 高まる品質要求に応えるために 測定技術向上を目指す

優れた加工技術に加え、厳格な品質管理体制も、ヒロコージェットテクノロジーのものづくりの根幹をなす重要な要素です。品質管理部部長 寺井 達也様は、ジェットエンジン部品の製造に求められる品質管理を次のように説明します。

「一般的なものづくりでは、仕上がり寸法や形状を測定して品質を保証します。

これに対してジェットエンジン部品の場合は、精度要求を満たし、仕様通りの部品を製造するのは当然のこととして、加工プロセスにおける加工方法や寸法も把握してコントロールすることが求められます」

部品加工や測定に関する情報は一元管理され、その部品が用いられたエンジンが役目を終えるまで保管されるといいます。万が一事故が発生した際

は、加工日や加工に携わった人物まで特定されるといいますから、その厳しさがよく分かります。

このような厳格な品質管理体制において重要な役割を担うのが、ミットヨ高精度CNC三次元測定機です。

「ジェットエンジン部品の加工では、工程内検査も含めて全数検査を実施しているので、かなり高い頻度で三次元測定機を使用しています。さらに開発・試作では最適な加工方法を探り出すため、加工する度に測定するというような使い方もします。したがって、我々にとって三次元測定機は、なくてはならないものになっています」(寺井部長)

ヒロコージェットテクノロジーでは、ミットヨの高精度CNC三次元測定機 FALCIO-Apex 162012、CRYSTA-Apex EX123010Rなどをご導入いただき、品質管理にお役立ていただいています。

測定を担当しているのは、品質管理部検査グループのメンバーです。同グループリーダーの川中 亮太様は、現場から見える課題について次のように語ります。

「近年、燃費向上要請の高まりを背景

に、大型のジェットエンジン部品加工には極めて厳しい精度が要求されるようになりました。汎用測定機では測れないケースも増えており、私たち検査員も測定技術のレベルアップを常日頃から心掛けていないと、いつかついていけなくなるという危機感をもっています」

こうした状況に対応するため、検査グループでは製造部門と意見交換しながら、常に測定技術の向上に取り組んでいます。また今後、検査員一人ひとりの測定に関する知識を深め、グループ全体で測定の課題解決力を高めていきたい考えです。

「ただ測定するだけでなく、加工方法の知識を裏付けにして、『どうして、この数値が出るのか』という踏み込んだところまで説明できることが、検査員には求められます。製造部門と品質管理部が切磋琢磨していくことにより、そうした理想に近づけるのではないかと思います」(寺井部長)

「目標は、メンバー全員が測定について高い水準で同等の認識を持ち、検査にあたるようになることです。上司や先輩から教えられてきた『検査は最後の砦』という言葉に常に意識しながら、協力し合ってレベルを高めていきたいと考えています」(川中様)

世界規格に基づく厳格な品質管理体制と向き合い、お客様の要望に100%の回答を出し続けるヒロコージェットテクノロジーは、今後更なる成長を遂げることでしょう。



品質管理部 部長 寺井 達也 様



品質管理部 検査グループリーダー  
川中 亮太 様

# 光周波数コム装置による長さの最新トレーサビリティ体系

弊社  
川崎 和彦・鈴木 義将・沼山 博志

## 1. はじめに

多くのメーカーでは生産した製品が設計値通りにできているかどうかを評価し、その品質を保証しています。ミットヨは製品の品質保証に欠かすことのできない測定機器を、国家標準につながるトレーサビリティ体系を維持して校正ユーザーに提供しています。

現在の日本における長さの国家標準は、産業技術総合研究所(以下、産総研)の所有する「協定世界時に同期した原子時計及び光周波数コム装置<sup>[1][2]</sup>(以下、光コム装置)」です。以前の国家標準であったよう素安定化He-Neレーザと比べると不確かさが非常に小さく、スペクトルの性質を利用することで、可視光から近赤外光の広い範囲で波長の物差しを供給できます。このことから、光コムは長さ標準技術の発展とトレーサビリティの確保に有用な革新的な技術であると言えます。

これまでミットヨは、国家標準と同様の光コム装置を用いたレーザ周波数校正システムを産総研と共同開発し、社内基準器の更なる信頼性向上と効率的なトレーサビリティ体系維持に取り組んできました。そして2017年に、光コム装置を用いたレーザ波長(周波数)校正において、初めてJCSSの登録事業者として認められました。そこで本稿では開発した光コム装置を用いたレーザ周波数校正システムについて紹介します。

## 2. 長さの標準とトレーサビリティ

### (1)メートルの定義と標準の実現方法

現在、1メートルは光速 $c$ の物理定数と時間 $t$ (=1/299 792 458 s)の積 $c \cdot t$ で定義されています<sup>[3]</sup>。より精度の高い長さの実現手段として、実際には、光速 $c$ と波長 $\lambda$ と周波数 $\nu$ の関係を利用し、周波数を安定化したレーザの真空中の波長が用いられます。

$$\lambda = c \cdot (1/\nu) \quad \text{式(1)}$$

つまり、正確な長さの物差しを作るということは、正確に周波数を測定することに他なりません。

長さの標準として代表的なレーザが、波長633nmのよう素安定化He-Neレーザで、2009年7月まで日本の長さの国家標準として用いられてきました。不確かさは $4.2 \times 10^{-11}$  ( $k=2$ )と言われており<sup>[4]</sup>、現在でも、民間企業における標準器として用いられています。

### (2)光コム装置

光コムはモード間隔 $f_{rep}$ が極めて等しいレーザです。その絶対周波数は $f_{rep}$ と $f_{ceo}$ を周波数ゼロの領域まで仮想的に延長した場合の余りの周波数 $f_{ceo}$ と、モード次数 $N$ を用いて表現できます。そのため、被校正レーザとの干渉によって発生したビート周波数 $f_{beat}$ を測定し、モード次数 $N$ を特定して、 $f_{rep}$ と $f_{ceo}$ を代入することで、被校正レーザの絶対周波数 $\nu_{laser}$ を測定することができます<sup>[5]</sup>。

$$\nu_{laser} = N \cdot f_{rep} + f_{ceo} + f_{beat} \quad \text{式(3)}$$

長さの特定標準器(国家標準)として、光コム装置を所有する産総研はレーザの校正サービスを不確かさ $1.4 \times 10^{-14}$  ( $k=2$ )で提供しています<sup>[6]</sup>。

### (3)トレーサビリティ制度

日本にはJCSS(Japan Calibration Service System:計量法トレーサビリティ制度)があり、JCSSへの適合性が認められ登録事業者になると、国家標準にトレーサブルな校正サービスを提供できます。JCSS登録事業者が社内標準として所有する特定二次標準器は定期的に特定標準器(国家標準)で校正しなければなりません。その校正サイクルは、例えばレーザの場合は、特定二次標準器と同等のレーザとの比較評価により性能維持が確認できる場合に限り5年まで延長できます。このように、JCSS登録事業者へは厳密な校正機器の管理が義務付けられています。

### (4)長さのトレーサビリティ体系の追加

光コムは、周波数標準や分光計測、幾何計測など様々な分野で応用研

究が行われています<sup>[7][8][9]</sup>。産業応用の一つがJCSS波長校正への利用です。我々は産総研との共同研究により、産総研以外でも国家標準にトレーサブルにレーザの波長を校正できる光コム装置を開発しました<sup>[10][11]</sup>。この研究成果とミットヨからの要望を受けて、2015年12月に、本手法がJCSSの長さのトレーサビリティに追加されました<sup>[12]</sup>。

現在の長さのトレーサビリティ体系を図1に示します。以前の体系では、長さの特定二次標準器は周波数の国家標準UTC(NMIJ)に同期した光コム装置によって校正された分子吸収線波長安定化レーザのみでした。追加されたトレーサビリティ体系では、JCSS登録事業者として光コム装置を使用する場合に限って周波数標準器も長さの特定二次標準器となります。周波数標準器を基準器にして、光コム装置でトレーサビリティ下位のレーザ基準器を校正する仕組みです<sup>[12][13]</sup>。

両体系とも、標準の源泉はともに周波数の国家標準と同じです。また追加された体系は、レーザ周波数を測定する基準器が周波数標準器で、それが周波数の国家標準にトレーサブルになることから素直な体系です。

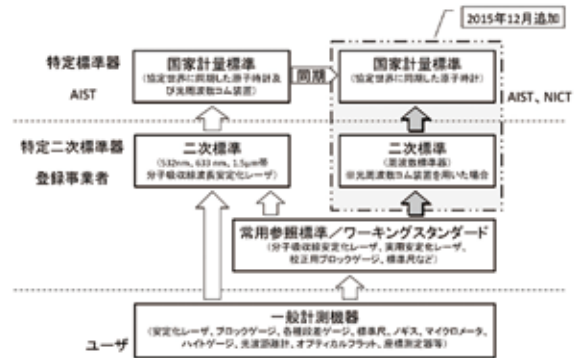


図1 長さのトレーサビリティ体系

この追加された体系に基づき、ミットヨで運用を開始した長さのトレーサビリティ体系を図2に示します。周波数の国家標準であるUTC(NMIJ)で校正された周波数標準器を特定二次標準器とし、光コム装置を使って常用参照標準のレーザを校正します。そして、下位の標準器や計測機器を校正の連鎖でつなぎ、ユーザーに提供する商品の多くでトレーサビリティを確保しています。光コム装置でレーザのJCSS校正を実施するにあたっては、NITE(製品評価技術基盤機構)に申請し、産総研立会いの技能審査を受けています。その結果、 $1.1 \times 10^{-13}$  ( $k=2$ , 1日平均時)の不確かさでレーザ周波数を校正できる能力を有すると認定を受けています。

### (5)光コム装置を用いる利点

光コム装置を用いる3つの利点を以下に述べます。

#### (1)持ち込み校正不要

後述するが、周波数標準器は毎日遠隔校正されるため、レーザのように持ち込み校正は不要です。従って、運搬時の破損や周波数変動のリスクがありません。また、経年変化や不具合等による周波数変動も監視できます。

#### (2)不確かさ小

周波数標準器の不確かさは分子吸収線の不確かさよりも小さいため<sup>[4][13][14]</sup>、光コム装置は不確かさの小さい基準器を有する測定器です。

#### (3)複数の波長標準を1台の装置で管理

光コムは波長変換技術と組み合わせることにより可視から近赤外領域で発振させることが出来ます。従って、1台で複数波長のレーザの標準としてトレーサビリティを一元管理できます。





図2 ミットヨにおける長さのトレーサビリティ体系

### 3. レーザ周波数測定システム

図3に光コム装置を用いたレーザ周波数測定システムの外観を、図4にシステム構成概要を示します。UTC(NMIJ)で校正された周波数標準器に同期した周波数シンセサイザから供給される $f_{rep}$ と $f_{CEO}$ の参照周波数に対して光コムを位相同期制御して光コムの周波数を安定化します。これにより光コム装置は国家標準にトレーサブルになります。

波長1.5  $\mu\text{m}$ 帯で発振する光コム発振器に、スペクトル広帯域化や高調波発生技術を組み合わせて、633 nmや532 nm波長帯の光コムを得ています<sup>[10][11]</sup>。光コムと被校正レーザの干渉により発生するビート周波数を周波数カウンタで測定し、被校正レーザの絶対周波数を測定します。



図3 光コムを用いたレーザ周波数測定システム

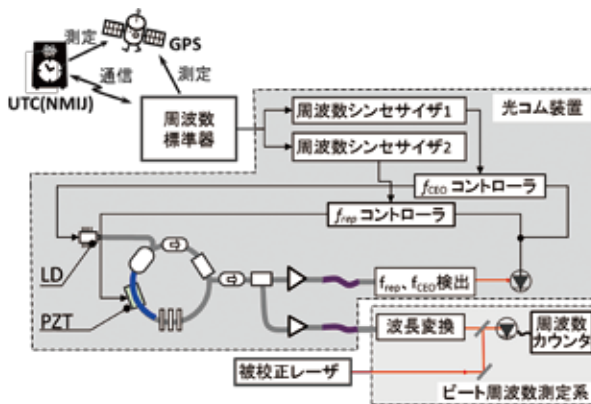


図4 システム構成概要

### 4. 周波数標準器

本装置の周波数標準器は、図5に示すGPS Common View法<sup>[14]</sup>によりUTC(NMIJ)を基準として、毎日、使用環境で遠隔校正されています。GPS Common View法では、比較する標準器1と2それぞれで、GPSの時間信号を同時に測定し比較するため、GPSの誤差の有無に関係な

く、高精度な比較測定が行えます。この原理を利用して、産総研は時間周波数の遠隔校正サービスを提供しています。遠隔校正の不確かさは距離に依存し、産総研とミットヨ間の距離は50 km以下であるため1日平均測定時で $1.1 \times 10^{-13}$  ( $k=2$ ) です<sup>[14]</sup>。我々の周波数標準器は周波数変動が遠隔校正の不確かさよりも小さいため、不確かさは $1.1 \times 10^{-13}$  ( $k=2$ )です。

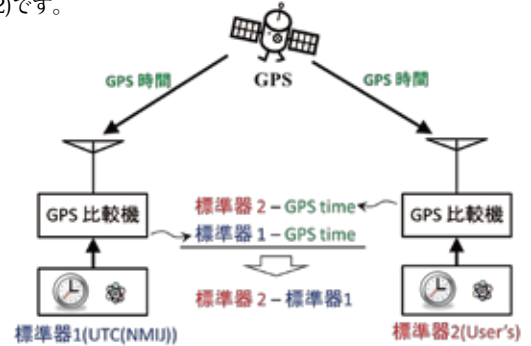


図5 GPS Common View法の原理

### 5. レーザ周波数測定能力の評価

光コム装置を用いたレーザ周波数測定能力に関する不確かさ要因を大別すると次の2つに分けられます。

- ①周波数標準器の不確かさ; $u_1$
- ②周波数標準器への同期の誤差; $u_2$

$u_1$ は遠隔校正によって得られるため $u_2$ を評価することで測定能力を見積もることが出来ます。

そこで、図6に示す装置構成により $u_2$ を評価しました。同様の光コム装置を比較対象としてもう1台用意し、2台の光コム装置を同一の周波数標準器に位相同期をかけ安定化します。そして、同一の安定化レーザを2台の光コム装置で同時に測定し、得られた2つの測定結果を引き算します。すると、共通の不確かさ要因である $u_1$ と安定化レーザの周波数変動が相殺されて、 $u_2$ が得られます。

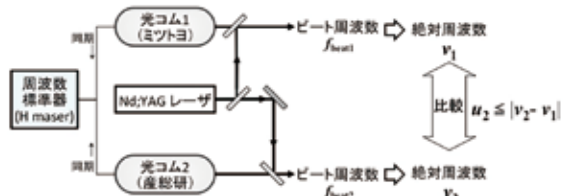


図6 周波数標準器への同期の誤差評価

産総研が所有する光コム装置との間で相对比较を行いました<sup>[10][11]</sup>。図7と図8に2台の光コム装置それぞれによる測定結果を、図9に両測定値の差を示します。図10に相対安定度の計算結果を示します。2台の光コム装置の差の平均値は0.14 Hzでした。平均化時間1000 sにおける相対安定度は $2.6 \times 10^{-16}$ で、平均化時間を長くすれば更に小さくなる結果が得られます。周波数標準器への同期の正確さ $u_2$ は極めて小さいことから、我々が開発した光コム装置によるレーザ周波数測定の不確かさは、上記①周波数標準器の不確かさ $u_1$ だけで決まり、 $1.1 \times 10^{-13}$  ( $k=2$ , 1日平均時) になります。

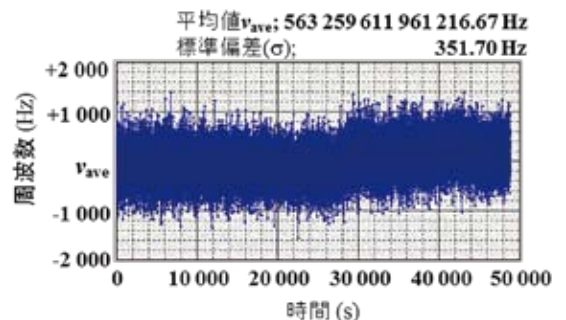


図7 光コム1(ミットヨ)による測定結果

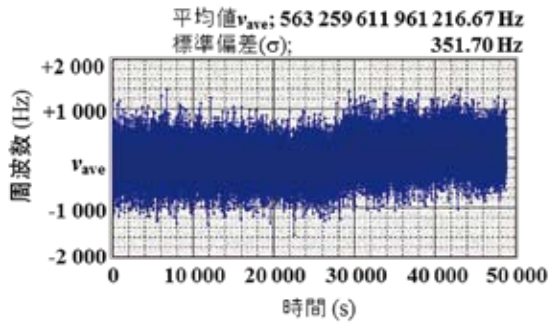


図8 光コム2 (産総研)による測定結果

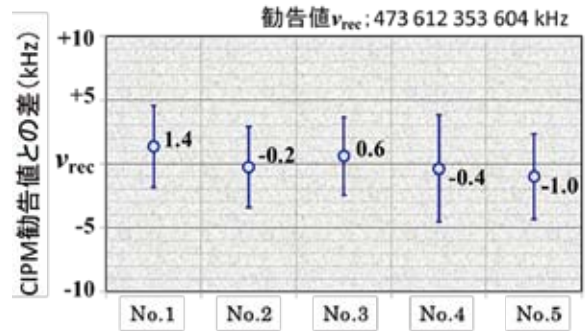


図11 よう素安定化He-Neレーザの周波数の再現性

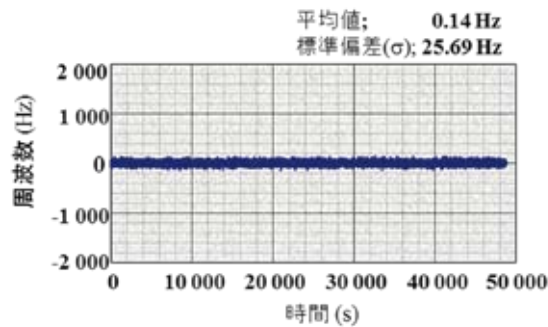


図9 2台の光コムによる測定値の差 (図7-図8)

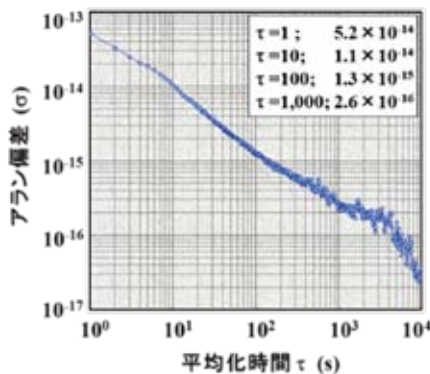


図10 2台の光コム装置の相対安定度評価結果

## 6. レーザ周波数測定実験

開発した光コム装置を用いて、よう素安定化He-Neレーザの電源再投入時の発振周波数の再現性を評価しました。評価結果を図11に示します。各測定では、光コム装置とのビート周波数を1s平均で86 400 s測定し、絶対周波数の平均値を算出しました。また、標準偏差 ( $\sigma$ ) をエラーバーで示しました。図では、国際度量衡委員会 (CIPM) で不確かさ10 kHz勧告されている周波数473 612 353 604 kHzからの偏差で示しました。CIPM勧告値との差は最大で+1.4 kHzでした。我々が常用参照標準として使用するよう素安定化He-Neレーザは周波数の再現性が高く、CIPMが勧告する周波数の不確かさよりも変動幅は小さいレーザであることが確認できました。

## 7. まとめ

国家標準にトレーサブルな光コム装置を用いたレーザ周波数測定システムを開発しました。本システムは不確かさが小さい上に、定期的な持ち込み校正が不要で使用環境下で毎日校正され、極めて信頼性の高い理想的な標準器です。本システムを用いたレーザ校正事業は、2017年4月にJCSS登録事業者として初めて認定されました。今後、本システムを活用して、ユーザーに提供する商品の信頼性の更なる向上に努めます。

### 謝辞

本紙は産業技術総合研究所との共同研究の成果を基にまとめたものです。ご指導頂いた周波数計測研究グループの稲場氏、時間標準研究グループ鈴木氏、現、横浜国立大学の洪氏に深く感謝いたします。

### 参考文献

- [1] T. Udem, et al. : "Absolute optical frequency measurement of the cesium D1 line with a mode-locked laser", Phys. Rev. Lett., Vol. 82, No. 18, pp. 3568-3571, (1999).
- [2] D. J. Jones, et al. : "Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis, Sci.", Vol. 288, No. 5466, pp. 635-639, (2000).
- [3] BIPM : "Documents concerning the new definition of the metre, Metrologia", 19 (1984) 163-177.
- [4] 石川 純 : 633nmレーザ波長校正と不確かさ, 産総研計量標準報告 Vol. 4, No. 1 (2005) 71-77.
- [5] H. Inaba, et al. : "Frequency measurement capability of a fiber-based frequency comb at 633nm" IEEE transactions on instrumentation and measurement, Vol. 58, No. 4, (2009) 1234-1240.
- [6] 稲場 肇 : "「長さの国家標準」が新方式に 光周波数コム装置を利用し「波長」を高精度化", 産総研TODAY 2009.11, pp28
- [7] S. Okubo, et al. : "Ultra-broadband dual-comb spectroscopy across 1.0-1.9  $\mu$  m", Applied Physics Express 8, 082402 (2015)
- [8] M. Yasuda, et al. : "Improved Absolute Frequency Measurement of the 171Yb Optical Lattice Clock towards a Candidate for the Redefinition of the Second" Applied Physics Express 5 (2012)
- [9] F.-L. Hong : Topical Review "Optical frequency standards for time and length applications" Meas. Sci. Technol. 28 (2017) 012002 (17pp)
- [10] K. Kawasaki, et al. : "Frequency measurement of a 532-nm iodine-stabilized laser using an optical frequency comb linked to UTC(NMIJ)" LMPMI, 2014
- [11] K. Kawasaki, et al. : "Laser Frequency Calibration System with Optical Frequency Comb Linked to UTC(NMIJ)" The 15th ICPE (2014), Kanazawa, Ishikawa, Japan, 509-512
- [12] NITE認定センター : "技術的要求事項適用指針(波長計量器・633 nm領域の波長, 532 nm領域の波長および1.5  $\mu$  m帯(Cバンド)の波長)" JCT20101-10
- [13] 高辻 利之 : "JCSSにおける長さのトレーサビリティ体系について" 計測標準と計量管理 Vol. 66, No. 2 (2016) 59-60.
- [14] 今江 理人ほか : "周波数標準の校正法とその不確かさ", 産総研計量標準報告 産総研計量標準報告 Vol. 5, No. 4 (2007) 291-301.

「光計測シンポジウム2017 予稿集」より引用

●本誌はご協力いただきました皆様の巻頭言の執筆原稿やユーザーレポートの取材等をもとに編集しています。

# 株式会社ミットヨ

本社 川崎市高津区坂戸 1-20-1 〒213-8533

仙台営業所(022)231-6881 宇都宮営業所(028)660-6240 伊勢崎営業所(0270)21-5471 川崎営業所(044)813-1611  
 厚木営業所(046)226-1020 諏訪営業所(0266)53-6414 浜松営業所(053)464-1451 安城営業所(0566)98-7070  
 名古屋営業所(052)741-0382 金沢営業所(076)222-1160 大阪営業所(06)6613-8801 京滋営業所(077)569-4171  
 岡山営業所(086)242-5625 広島営業所(082)427-1161 福岡営業所(092)411-2911  
 センシング営業部 (044)813-8236 カスタマーサポートセンター(050)3786-3214

http://www.mitutoyo.co.jp



●このパンフレットは、環境にやさしい「水なし印刷」  
「植物油インキ」を使用しています。